

19

OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 406 182**

21 Número de solicitud: 201100511

51 Int. Cl.:

G11C 11/15 (2006.01)**H01F 10/32** (2006.01)**B82Y 25/00** (2011.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A2

22 Fecha de presentación:

04.05.2011

43 Fecha de publicación de la solicitud:

05.06.2013

71 Solicitantes:

UNIVERSIDAD DE OVIEDO (25.0%)
SAN FRANCISCO 3
33003 OVIEDO (Asturias) ES;
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID (25.0%);
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES
CIENTÍFICAS (CSIC) (25.0%) y
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE (25.0%)

72 Inventor/es:

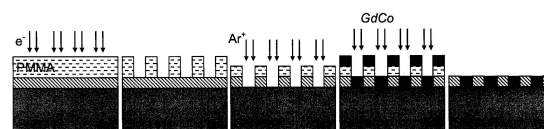
JUNQUERA PÉREZ, Alejandro;
ALILJA BAYÓN, Alejandro;
ÁLVAREZ PRADO, Luis Manuel;
VÉLEZ FRAGA, María;
ALAMEDA MAESTRO, José María;
MARTÍN CARBAJO, José Ignacio;
MARCONI, Verónica I.;
KOLTON, Alejandro B.;
RODRIGUEZ PARRONDO, Juan Manuel;
ANGUITA ESTEFANÍA, José V. y
SOUCHE, Yves

54 Título: **SOPORTE MAGNÉTICO PARA LA GRABACIÓN Y LECTURA DE INFORMACIÓN, MÉTODO DE ALMACENAMIENTO Y LECTURA DE INFORMACIÓN Y SU USO**

57 Resumen:

Soporte magnético para la grabación y lectura de información, método de almacenamiento y lectura de información y su uso. El soporte magnético comprende un circuito magnético definido en una lámina delgada magnética con anisotropía uniaxial y un nanocomposite constituido por una red bidimensional de nanopozos asimétricos rellenos de otro material magnético de mayor coercitividad y/o anisotropía que la lámina delgada magnética. También es objeto de la invención un método de almacenamiento y lectura de información simultáneo mediante desplazamiento de paredes magnéticas y su uso en la encriptación de información. De aplicación en los sectores en los que se diseñen, produzcan o utilicen dispositivos magnéticos para el almacenamiento y lectura de información, como en los sectores de material y equipo eléctrico, electrónico y óptico, de informática, de tecnologías de la información y de la comunicación, de maquinaria y equipo mecánico, y de transportes y comunicaciones.

FIG. 1



ES 2 406 182 A2

DESCRIPCIÓN

SOPORTE MAGNÉTICO PARA LA GRABACIÓN Y LECTURA DE INFORMACIÓN, MÉTODO DE ALMACENAMIENTO Y LECTURA DE INFORMACIÓN Y SU USO.

5 Esta invención se refiere a un aparato, a un método y su uso, para escribir y leer información sin necesidad de otros objetos mecánicos o diferentes cabezas magnéticas, a partir del desplazamiento de paredes magnéticas en láminas delgadas de nanocompuestos magnéticos nanoestructurados.

10 La presente invención es de aplicación en los sectores en los que se diseñen, produzcan o utilicen dispositivos magnéticos para el almacenamiento y lectura de información, como por ejemplo en los sectores de material y equipo eléctrico, electrónico y óptico, de informática, de tecnologías de la información y de la comunicación, de maquinaria y equipo mecánico, y de transportes y comunicaciones.

15 ESTADO ANTERIOR DE LA TÉCNICA

 Esta invención está relacionada con los sistemas y aparatos de lectura y grabación magnéticos adaptados para sensores magnéticos, comunicaciones seguras a través de protocolos seguros, discos duros usados en ordenadores personales, grandes clústeres de computación, y servidores de comunicaciones, entre otros.

20 Actualmente, existen varios tipos de tecnologías aplicadas al almacenamiento de la información de forma no volátil a través de soportes de almacenamiento magnéticos (C. D. Mee and E. D. Daniel, *Magnetic Storage Handbook* (McGraw-Hill, New York, 1996); G. Prinz, J. Magn. Mater. 200, 57 (1999)). En muchos de los dispositivos más habituales de grabación magnética digital, utilizados por ejemplo en
25 la tecnología de discos duros, se emplean como base los dominios magnéticos en una lámina delgada magnética, es decir, las regiones donde la imanación espontánea promedio para un material ferromagnético se encuentra bien definida. En el caso concreto de una lámina delgada de material ferromagnético, con una anisotropía uniaxial bien definida, los valores binarios 0 y 1 de cada bit pueden ser interpretados
30 como los dos posibles estados de imanación asociados a cada dominio.

Por otra parte, también se conocen desde hace tiempo los dispositivos de grabación magnética mediante desplazamiento de paredes de dominio magnético (en adelante DW) en láminas delgadas magnéticas, pero con un campo de aplicación limitado. En concreto, durante las últimas décadas se han desarrollado invenciones para la fabricación de un tipo de memorias magnéticas conocidas como registradores por desplazamiento magnéticos (US Patent No. 6,834,005; US Patent No. 6,898,132; US Patent No. 7,031,178). Las versiones más recientes de estos dispositivos utilizan DW ancladas sobre una pista de material ferromagnético, típicamente Py (Permalloy), a través de la cual se hace circular una corriente eléctrica polarizada en spin de tal modo que se produce una fuerza de torque de spin o *spin torque*. Este torque de spin mueve la DW pudiendo alcanzarse velocidades muy altas, del orden de 100 m/s. El método de grabación y lectura que emplean los registradores por desplazamiento magnéticos se vale de la actual tecnología de uniones túnel (US Patent Nos. 5,650,95; 5,729,410 y 5,801,984).

Debido a ello el problema de la propagación de DW en láminas delgadas magnéticas persiste hoy en día como un campo de gran interés (M. Kardar, arXiv:cond-mat/9704172; S. Lemerle et al., Phys. Rev. Lett. **80**, 849 (1998); J. P. Attane et al., Phys. Rev. Lett. **93**, 257203 (2004); Y. L. Iutin et al., Phys. Rev. Lett. **98**, 117204 (2007); E. Martinez et al. Phys. Rev. Lett. **98**, 267202 (2007)). Existe un caso de interés particular cuando ocurre que el potencial de anclaje para las DW resulta asimétrico, favoreciendo la propagación de la DW en una dirección. Esto se conoce como efecto rectificador o *efecto ratchet* (P. Reimann, Phys. Rep. **361**, 57 (2002)). Uno de los primeros ejemplos conocidos de aplicación del efecto ratchet en magnetismo aparece en los primeros registradores por desplazamiento magnéticos (N. Hayashi et al., IEEE Trans. Magn. **8**, 370 (1972)) en el que se empleaba un patrón tipo *angelfish* para controlar el movimiento de una DW en forma de burbuja. Mucho más recientemente han sido publicados numerosos estudios sobre movimiento asimétrico de DW en nano-hilos magnéticos en los que el potencial de anclaje de la pared se define a partir de la geometría del nanohilo (D. A. Allwood, G. Xiong, and R. P. Cowburn, Appl. Phys. Lett. **85**, 2848 (2004)). En los casos anteriormente citados el movimiento en hilos magnéticos restringe la dimensionalidad del sistema a 1D, lo que supone una clara limitación en el tipo de memoria magnética en el que puede

emplearse (registradores por desplazamiento magnéticos), y en el número de bits de información que pueden almacenarse en cada dispositivo.

Por otra parte, si se desea extender esta tecnología a dispositivos basados en láminas delgadas magnéticas extensas, es necesario que existan zonas en el interior de la lámina delgada magnética a través de las cuales se encuentre definida una dirección preferencial para el movimiento de las DW. La forma más habitual de controlar esta propagación es mediante la fabricación de redes ordenadas de microagujeros en las láminas delgadas magnéticas que actúen como centros de anclaje para las DW (R. P. Cowburn, A. O. Adeyeye y J. A. C. Bland, *Appl. Phys. Lett.* **70**, 2309 (1997)). Sin embargo, cuando la densidad de agujeros es suficientemente diluida para no alterar la anisotropía de la lámina delgada magnética, la efectividad de estos agujeros es relativamente baja en comparación con el desorden intrínseco en las láminas delgadas magnéticas, (A. Pérez-Junquera, G. Rodríguez-Rodríguez, M. Vélez, J. I. Martín, H. Rubio y J. M. Alameda, *J. Appl. Phys.* **99**, 033902 (2006) ; A. Pérez-Junquera, V. I. Marconi, A. B. Kolton, L. M. Alvarez-Prado, Y. Souche, A. Alija, M. Velez, J. V. Anguita, J. M. Alameda, J. I. Martín, and J. M. R. Parrondo, *Phys. Rev. Lett.* **100** (2008) 037203) lo que presenta problemas de reproducibilidad de cara a su aplicación en un dispositivo.

20

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

La presente invención se refiere a un aparato, a un método y su uso, para escribir y leer información sin necesidad de otros objetos mecánicos o diferentes cabezas magnéticas, a partir del desplazamiento de paredes magnéticas en láminas delgadas de nanocompuestos magnéticos nanoestructurados.

Un aspecto de la presente invención es un soporte magnético para la grabación y lectura de información mediante desplazamiento de paredes de dominio magnéticas que comprende un circuito magnético definido en una lámina delgada magnética con anisotropía uniaxial y un nanocompuesto constituido por una red bidimensional de nanopozos asimétricos rellenos de otro material magnético de mayor coercitividad y/o anisotropía que la lámina delgada magnética. A los efectos de esta invención y su

descripción, el término asimétrico referido a los nanopozos debe entenderse como la falta de simetría de reflexión según el plano definido por la dirección perpendicular a la lámina delgada y el eje de fácil imanación de la anisotropía uniaxial de la lámina magnética.

- 5 En una realización preferida, la lámina delgada magnética está hecha de un material magnético amorfo basado en aleaciones de $\text{Co}_x\text{Si}_{1-x}$ ó $\text{Co}_x\text{Zr}_{1-x}$, con comportamiento magnético blando.

- En otra realización preferida, los nanopozos están rellenos de una aleación de $\text{Gd}_x\text{Co}_{1-x}$ en la que los momentos magnéticos del Gd dominan la orientación de la
10 imanación a temperatura ambiente.

 En otra realización preferida, los nanopozos están rellenos de Co policristalino con mayor imanación de saturación que la lámina delgada magnética.

- En una realización específica, la red bidimensional de nanopozos de estructura asimétrica es cuadrada y se fabrica sobre la lámina delgada magnética mediante un
15 proceso de litografía y ataque sin eliminar la máscara de resina existente en la superficie de la lámina, seguido por la deposición del material magnético de relleno y un último proceso de lift-off en acetona para eliminar la máscara de resina y el material magnético de relleno sobrantes. En una realización más específica, el proceso de litografía es por haz de electrones y el proceso de ataque es por bombardeo de
20 iones de Ar. En otra realización más específica, el circuito magnético se define en torno a la región nanoestructurada con la red bidimensional de nanopozos asimétricos mediante una zanja que separa dicha región del resto de la lámina magnética, empleando litografía óptica y ataque químico. En otra realización más específica, la nanoestructuración se lleva a cabo en una lámina delgada magnética donde se ha
25 definido previamente el circuito magnético. A los efectos de esta invención y su descripción el término zanja debe entenderse como una región sin material magnético en forma de línea poligonal de con un ancho entre 5 y 10 micras que rodea completamente el circuito magnético donde está situado el nanocompuesto.

Otro aspecto de la presente invención es un método de almacenamiento de información y lectura mediante desplazamiento de paredes magnéticas que comprende las siguientes etapas:

5 a) Grabación del estado magnético positivo o negativo mediante una señal de campo magnético que introduce una pared de dominio en un nanocompuesto magnético ordenado nanoestructurado de forma asimétrica bidimensional a partir de un estado de saturación positiva o negativa.

10 b) Lectura del estado grabado según la etapa a) mediante la aplicación de una señal alterna de campo magnético de amplitud inferior al 20% del campo coercitivo sobre el nanocompuesto magnético ordenado nanoestructurado de forma asimétrica bidimensional, que produce una pérdida o ganancia de imanación cuyo signo indica el estado grabado. Estas variaciones de la imanación están asociadas a la acomodación asimétrica de la DW y tienen una amplitud típica entre un 4% y un 10% del valor de la
15 imanación de saturación dependiendo de la geometría concreta del nanocompuesto magnético ordenado nanoestructurado de forma asimétrica bidimensional.

En una realización preferida, la señal de campo magnético es una onda triangular producida por un generador de ondas arbitrario y amplificada por una fuente
20 de corriente que alimenta un electroimán encargado de generar el campo magnético sobre el nanocompuesto magnético ordenado nanoestructurado de forma asimétrica bidimensional. En una realización más preferida, el campo magnético se aplica en el eje fácil de anisotropía uniaxial del nanocompuesto magnético ordenado nanoestructurado de forma asimétrica bidimensional.

25 En otra realización preferida, la lectura de las variaciones de la imanación se transforma en una señal de voltaje mediante la medida del efecto Kerr transversal en el nanocompuesto magnético ordenado nanoestructurado. El tamaño del área incluida en la medida de efecto Kerr transversal, y la posibilidad de obtener la señal de distintas posiciones seleccionadas del nanocompuesto magnético ordenado
30 nanoestructurado de forma asimétrica bidimensional determinan la densidad de

información que puede almacenarse en el soporte (es decir, la definición de distintas regiones de grabación).

Otro aspecto de la presente invención es el uso del método de almacenamiento de información y lectura mediante desplazamiento de paredes de dominio magnéticas para la encriptación de información en la secuencia de campo de lectura y/o escritura
5 sobre un nanocompuesto magnético ordenado nanoestructurado de forma asimétrica bidimensional, y en el que se ha diseñado la geometría/material de relleno de los nanopozos en las distintas regiones de grabación del soporte para que sólo puedan ser activados para la grabación de los bits con la secuencia de campo adecuada en un
10 sistema de clave (secuencia de campo) - cerradura (nanocompuesto magnético ordenado nanoestructurado). El usuario utiliza el método de almacenamiento de la información y lectura sobre un nanocompuesto magnético nanoestructurado pudiendo abrir la cerradura sólo cuando la clave genere la activación correcta de todos los valores de los bits en las distintas regiones de grabación del nanocompuesto
15 magnético ordenado nanoestructurado. También es posible que un usuario programe la cerradura introduciendo una DW en el nanocompuesto magnético ordenado nanoestructurado y otro usuario la abra leyendo la información contenida en los bits presentes en las distintas regiones de grabación. En el proceso de lectura de dicha información se modifica levemente el estado de partida (configuración de la DW en el
20 nanocompuesto magnético ordenado nanoestructurado de forma asimétrica) lo que permite la detección por parte del segundo usuario de intentos previos de apertura de la cerradura.

En una realización específica, el diseño de la geometría de los nanopozos/material de relleno para la determinación de los valores de campo
25 necesarios para la grabación de la información en las distintas regiones de grabación se realiza mediante simulaciones micromagnéticas.

En otra realización específica, la calibración de los valores de campo necesarios para la grabación y lectura de los estados magnéticos en cada región de grabación se hace mediante un microscopio de dominios magnéticos por efecto Kerr.
30 En una realización más específica, los campos magnéticos para la grabación de los estados son aquellos que originan un desplazamiento de izquierda a derecha de una

DW a través de una fila de nanopozos en el nanocompuesto magnético con nanoestructuración asimétrica bidimensional.

Una de las ventajas que proporciona el soporte magnético basado en un nanocompuesto magnético ordenado nanoestructurado de forma asimétrica bidimensional, es la de combinar la nanoestructuración asimétrica bidimensional (que da lugar al efecto ratchet) con una buena efectividad en los centros de anclaje para las DW (basada en las diferentes propiedades magnéticas de la lámina delgada magnética y el material de relleno de los nanopozos). Asimismo, en comparación con los sistemas basados en propagación de DW a través de nanohilos, el carácter bidimensional del soporte descrito en la presente invención aumenta el número de bits grabables en el mismo, asociados a las distintas configuraciones de la DW respecto a la red ordenada de nanopozos asimétricos.

El método recogido en la presente invención proporciona la posibilidad de extender el campo de aplicación de los dispositivos de grabación magnética basados en DW a un nuevo tipo de memoria. Con este método es posible recuperar la información binaria (1/0) contenida en el signo de la última saturación del soporte de grabación, de manera semejante a los dispositivos de grabación magnética basados en dominios magnéticos, pero a partir de un estado de remanencia cero.

El uso propuesto en la presente invención para la encriptación de la información en un sistema clave (secuencia de campo) - cerradura (nanocompuesto ordenado) presenta dos importantes ventajas: en primer lugar, la versatilidad de combinaciones de claves de grabación que pueden diseñarse optimizando la geometría/material de relleno de los nanopozos y, en segundo lugar, la posibilidad de detectar a través del método de medida alteraciones sufridas en el estado grabado debido a una lectura previa de la información, lo que supone una garantía extra de seguridad.

La presente invención es de aplicación en los sectores en los que se diseñen, produzcan o utilicen dispositivos magnéticos para el almacenamiento y lectura de información, como por ejemplo en los sectores de material y equipo eléctrico,

electrónico y óptico, de informática, de tecnologías de la información y de la comunicación, de maquinaria y equipo mecánico, y de transportes y comunicaciones.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

5 La Fig. 1 muestra un esquema del proceso de fabricación del nanocompuesto magnético ordenado donde (a) muestra el paso de iluminación de la resina PMMA con un haz de electrones para dibujar el patrón deseado, (b) muestra el paso de revelado de la resina PMMA, (c) muestra el paso del ataque iónico mediante un haz de iones Ar^+ , (d) muestra el paso del crecimiento por pulverización catódica de una lámina del
10 material de relleno y (e) muestra el paso de eliminación del PMMA restante.

La Fig. 2A muestra un esquema de la zanja que separa el nanocompuesto ordenado del resto de la lámina delgada magnética donde el cuadro rayado representa el nanocompuesto y la línea continua en forma de maza representa la zanja.

La Fig. 2B muestra un esquema de la celda unidad de la red cuadrada de
15 motivos asimétricos.

La Fig. 3 muestra tres gráficos (a), (b) y (c) donde: (a) representa la curva de campo que se ha utilizado para modular los movimientos de la DW dentro del nanocompuesto ordenado. Para los campos H_1 , H_2 y H_3 se produce el proceso de introducción de las DW que definen la secuencia temporal de bits [1 0 1]. En las
20 ordenadas se representa el campo magnético (H) en Oersted y en las abscisas el tiempo (t) en segundos; (b) representa la lectura de la información a través de las variaciones temporales de la imanación, mostrando las distintas fases sucesivas (F1, F2 y F3) en las que se va alternando el valor del bit almacenado en el nanocompuesto ordenado: F1 ($[\Delta M < 0] \equiv 1$); F2 ($[\Delta M > 0] \equiv 0$); F3 ($[\Delta M < 0] \equiv 1$). En las ordenadas
25 se muestra la imanación normalizada por el valor de la imanación de saturación (M/M_S) y en las abscisas el tiempo (t) en segundos; y (c) muestra una ampliación de las fases F2 y F3 donde puede apreciarse en más detalle el cambio en la imanación ΔM que se produce durante el proceso de lectura. En las ordenadas se muestra la imanación normalizada por el valor de la imanación de saturación (M/M_S) y en las

abscisas el tiempo (t) en segundos, G indica el instante en el que se realiza la grabación.

La Fig. 4 muestra el resultado de una simulación del paso de una DW a través de una fila de nanopozos asimétricos de $4\mu\text{m}$ de tamaño en un campo de grabación de 20 Oe con una distancia variable entre nanopozos ($d = 2\mu\text{m}$, $4\mu\text{m}$, $2.75\mu\text{m}$ y $2.75\mu\text{m}$ de arriba a abajo respectivamente).

EXPLICACIÓN DE UNA FORMA DE REALIZACIÓN PREFERIDA

Para una mejor comprensión de la presente invención, se exponen los siguientes ejemplos de realización preferente, descritos en detalle, que deben entenderse sin carácter limitativo del alcance de la invención.

Ejemplo 1. Forma de realización preferida del soporte magnético para la grabación y lectura de información.

La fabricación del soporte magnético para la grabación y lectura de información objeto de la presente invención se realizó comenzando por la fabricación de un nanocompuesto sobre una lámina delgada magnética para, a continuación, realizar la definición del circuito magnético. Se empleó una lámina delgada magnética de $\text{Co}_{0.73}\text{Si}_{0.27}$ de 40 nm de espesor con imanación de saturación $M_s = 200\text{ emu/cm}^3$, baja coercitividad $H_c = 8\text{ Oe}$ y anisotropía uniaxial bien definida $K_u = 10^4\text{ erg/cm}^3$. Esta lámina delgada magnética se creció sobre un sustrato de Si(111) por codeposición empleando la técnica de pulverización catódica usando blancos de material puro (Co y Si) y ajustando la composición, gracias a los ritmos de depósito en una balanza de cuarzo.

Sobre esta lámina delgada magnética se fabricó un nanocompuesto a través de un proceso basado en litografía por haz de electrones (como el indicado en la Fig. 1). Se comenzó extendiendo una capa de unos 200 nm de espesor de una resina sensible a los electrones, conocida como PMMA (polimetilmetacrilato), sobre la lámina delgada magnética. En concreto, se empleó una resina de PMMA donde la cadena de polímero posee un peso molecular de 950000 g/mol y viene disuelta al 4 % en Anisol. Para ello

se depositó una gota de la resina polimérica sobre la lámina delgada magnética y se la hizo girar a 4800 r.p.m. durante 1 minuto para extender completamente la capa de resina resultante y, posteriormente, se calentó en un horno para homogeneizar su textura. Los parámetros que se utilizaron en el recocido fueron 2 horas, a 150 °C. A

5 continuación se expuso la muestra al haz de electrones de un microscopio electrónico de barrido (SEM), modificado para poder realizar litografía electrónica. Esta modificación consiste en conectar al microscopio una electrónica controlada por ordenador que es capaz de mover a voluntad el haz de electrones dibujando así el patrón de la geometría que se pretende conseguir, en este caso la red bidimensional de

10 nanopozos. Para ello se iluminaron únicamente aquellas regiones del PMMA en donde posteriormente se obtuvieron los agujeros (ver Fig. 1 paso (a)). Los parámetros que se utilizaron para la realización de la litografía fueron: voltaje de aceleración de 20 kV, corriente del haz de 100 pA, procedente de un filamento de tungsteno, y dosis para la resina electrónica de $160 \mu\text{C}/\text{cm}^2$.

15 En la segunda etapa de la fabricación se realizó un revelado de la resina. Este es un paso crítico donde se necesita controlar, con gran precisión, el tiempo de revelado. El revelado se realizó en una mezcla 1:3 de MIBK:IPA (una parte de metilisobutilacetona y tres partes de isopropanol) durante 50 segundos a temperatura ambiente, e inmediatamente después se sumergió la muestra en isopropanol durante

20 unos 20 segundos para detener el revelado. Así se consiguió eliminar la resina de las zonas expuestas a los electrones (ver Fig. 1 paso (b)). Al terminar este tiempo se secó la muestra bajo un flujo de nitrógeno seco.

La tercera etapa de fabricación fue la creación de los agujeros en la lámina delgada magnética mediante el bombardeo de la muestra con un haz de iones Ar^+ . La

25 parte más delicada de este proceso es conseguir realizar los agujeros en la lámina antes de que el mismo haz iónico desgaste la totalidad de la capa de resina que protege la zona de la lámina al mismo tiempo que la resina remanente no sea excesivamente endurecida (ver Fig. 1 paso (c)). El ataque iónico se realizó generando un plasma ECR (Electron Cyclotron Resonance) de Ar mediante la excitación de electrones en el seno

30 del gas Ar por medio de un campo de microondas de 2.45 GHz de frecuencia y un campo magnético continuo de 875 Gauss. Los iones Ar^+ resultantes del impacto e^- -

Ar son extraídos del plasma y energizados perpendicularmente hacia la muestra. La densidad de iones típica es de $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ con una energía de 500 eV, de tal forma que la velocidad de ataque de la lámina de $\text{Co}_{73}\text{Si}_{27}$ en los agujeros fue de 84 Å/minuto y la de la resina PMMA de 104 Å/minuto. Mayor densidad de iones
 5 conduce a un excesivo endurecimiento de la capa de resina PMMA por el calor generado por el bombardeo, haciendo inviable el proceso posterior de quitado de la resina PMMA. La geometría de los nanopozos resultante se caracterizó mediante microscopía de fuerza atómica para comprobar el resultado obtenido. En particular, se realizaron perfiles de topografía a través de los nanopozos para medir la profundidad
 10 de los nanopozos fabricados durante el proceso de ataque iónico.

La cuarta etapa de fabricación fue crecer sobre toda la muestra la lámina del material de relleno del mismo espesor que la lámina delgada magnética de $\text{Co}_{73}\text{Si}_{27}$ antes de quitar la resina, de este modo el material se deposita por igual dentro de los pozos y encima de la resina (ver Fig. 1 paso (d)). El crecimiento del material de
 15 relleno se realizó mediante pulverización catódica, de manera semejante a la lámina delgada continua. Se emplearon distintas opciones para el material de relleno (nanopozos vacíos, rellenos de Co puro policristalino y de una aleación $\text{Co}_{0.7}\text{Gd}_{0.3}$ con una anisotropía uniaxial en el plano bien definida ($K_u = 4 \times 10^4$) y cuya imanación total a temperatura ambiente ($M_S = 350 \text{ emu}/\text{cm}^3$) está dominada por los momentos
 20 magnéticos de Gd. Para una geometría dada, la eficacia de los nanopozos como centros de anclaje para las DW, que es un factor clave para la reproducibilidad del soporte de grabación magnética, se obtuvo del incremento en el campo coercitivo en el eje fácil. Se encontró una fuerte dependencia con el material de relleno (por ejemplo, en un experimento de control con una red bidimensional de nanopozos
 25 elípticos, se obtuvo un incremento en el campo coercitivo tres veces mayor al rellenar los pozos con la aleación de $\text{Co}_{0.7}\text{Gd}_{0.3}$ en comparación con un nanocompuesto relleno de Co puro o con los nanopozos vacíos).

Por último, para obtener el nanocompuesto con la red ordenada de nanopozos rellenos se disolvió la resina PMMA restante con acetona (ver Fig. 1 paso (e)). Se
 30 realizó una caracterización mediante microscopía de fuerza atómica para confirmar la obtención del resultado deseado. En particular, se realizaron perfiles de topografía a

través de los nanopozos para comprobar que los nanopozos se habían rellenado completamente.

Una vez obtenido el nanocompuesto con la red bidimensional de nanopozos asimétricos se procedió a definir el circuito magnético por el que se mueven las
 5 paredes responsables de la grabación de los diferentes dominios, aislando con ello el resto de la lámina delgada para evitar interacciones. Para ello, se fabricó mediante litografía óptica una zanja, es decir una región sin material magnético en forma de línea poligonal con una anchura de $5\mu\text{m}$ rodeando completamente el circuito magnético que engloba al nanocompuesto con una forma tal que la parte izquierda del
 10 nanocompuesto tiene más material magnético que la parte derecha (después del nanocompuesto) y así favorecer la formación de DW en la parte izquierda (ver Fig. 2A). Al invertir la imanación, sólo las DW procedentes de la región izquierda pueden penetrar en el nanocompuesto propagándose de izquierda a derecha a causa de la forma de los pozos asimétricos, permitiendo la grabación de estados sucesivamente.

15 La fabricación de esta zanja se realizó mediante litografía óptica. Primero se extendió una capa de unos 500 nm de resina sensible a la luz ultravioleta, recomendada para una longitud de onda de 405 nm y se calentó a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 30 minutos para homogeneizar su superficie. El segundo paso consistió en exponer la resina a la luz ultravioleta, interponiendo entre la fuente de luz y la muestra una
 20 máscara con los motivos a litografiar durante 12 segundos. A continuación, se realizó el revelado en el líquido revelador correspondiente a la resina empleada. Por último, se procedió a atacar las zonas de la muestra que habían quedado libres de resina con un haz de iones de Ar^+ y se disolvió la resina restante en acetona. Este proceso permitió alinear muy bien la zanja con la red de motivos definida previamente y
 25 fabricada en la etapa anterior.

La geometría del soporte magnético de grabación que se obtuvo finalmente puede verse en la Fig. 2, con distintas escalas de ampliación: en la Fig. 2A se muestra el circuito magnético separado del resto de la lámina delgada magnética por una zanja en forma de maza, con una gran área de nucleación de paredes en la parte izquierda
 30 del nanocompuesto que sería la cabeza de la maza, de 2 mm de ancho por 4.5 mm de alto, y un camino de 2 mm de largo por 0.5 mm de ancho, que sería el mango de la

maza, en cuyo centro se sitúa el nanocompuesto; la red de nanopozos asimétricos ocupa un área de $500 \times 500 \mu\text{m}^2$, formada por un mismo tipo de nanopozo que se repite en una matriz cuadrada de 25 filas x 25 columnas. La Fig. 2B muestra la geometría de los nanopozos asimétricos, separados entre sí $20 \mu\text{m}$ en ambas direcciones y con un ancho de $2.5 \mu\text{m}$. La geometría de los nanopozos en forma de flecha orientada perpendicularmente al eje de fácil imanación, definido por la anisotropía uniáxica de la lámina magnética, carece de simetría de reflexión según este eje, es decir, son asimétricos en el sentido definido en esta invención.

Ejemplo 2. Forma de realización preferida del método de almacenamiento de información y lectura mediante desplazamiento de paredes magnéticas.

La grabación de los estados magnéticos se realizó sobre un soporte como el descrito en el apartado anterior basado en un nanocompuesto magnético ordenado nanoestructurado de forma asimétrica bidimensional. La señal para la grabación del estado magnético se generó a través de un generador de ondas arbitrarias, previamente programado con las curvas de voltaje-tiempo adecuadas (ver Fig. 3, gráfico (a)). Esta señal de voltaje variable con el tiempo fue amplificada por una fuente de corriente y, posteriormente, enviada a un electroimán que se encargaba de aplicar el campo magnético necesario para grabar la información en el soporte. Este campo magnético se alineó con el eje fácil de anisotropía uniaxial de la lámina delgada magnética sobre la que se fabricó el nanocompuesto. La lectura de la información grabada se realizó mediante la medida del efecto Kerr transversal para convertir las variaciones de la imanación en una señal de voltaje (Fig. 3, gráfico (b)). En esta medida se empleó un haz láser focalizado en un área de $300 \mu\text{m}$ de diámetro dentro del nanocompuesto magnético ordenado. El diámetro del área en la que se focaliza el haz láser determina el tamaño asociado a cada bit de información en el nanocompuesto ordenado y su posición la zona del soporte de grabación magnética de la cual se recupera la información grabada. Para realizar la grabación de un estado (ver Fig. 3) se comenzó inicializando el soporte de grabación aplicando un campo suficientemente intenso para saturarlo magnéticamente y, a continuación, se introdujo una DW en el nanocompuesto ordenado aplicando un campo próximo al campo coercitivo. El efecto de aplicar un campo alterno de pequeña amplitud una vez que la DW está en el

interior del nanocompuesto ordenado es una ligera variación en la imanación ΔM (aumento/disminución) cuyo signo depende del signo del campo empleado para introducir la DW. En particular, cuando la DW se introduce a campo positivo se aprecia después un descenso en M ($\Delta M < 0$) y, por su parte, se observa un aumento en M cuando la DW se introduce a campo negativo ($\Delta M > 0$). De este modo se pudo asignar un valor binario 1/0 a la información contenida en el signo de ΔM ($[\Delta M < 0] \equiv 1$; $[\Delta M > 0] \equiv 0$). La Fig. 3 muestra la grabación (ver Fig. 3, gráfico (a)) y lectura (ver Fig. 3, gráfico (b) y gráfico (c)) de una secuencia [1 0 1]. En el caso de no existir una DW en el interior del nanocompuesto ordenado, no se produce ninguna variación en la imanación al aplicar el campo alterno de lectura, es decir, $\Delta M = 0$, lo que se corresponde con un estado inactivo del soporte de grabación magnética.

Ejemplo 3. Forma de realización preferida del uso del soporte para la grabación y lectura de información y el método de almacenamiento de información y lectura mediante desplazamiento de paredes magnéticas para la encriptación de la información en un sistema clave-cerradura.

El elemento fundamental para permitir el uso del soporte y del método objeto de la presente invención en un sistema clave-cerradura estriba en la posibilidad de un diseño a medida de los campos de grabación/lectura en las distintas regiones de grabación del soporte. Para ello, se realizaron simulaciones micromagnéticas de forma sistemática en función de las características geométricas de las redes de motivos asimétricos en forma de flecha, tal y como los mostrados en la Fig. 2B. Se definió en cada caso el campo magnético de grabación como el campo característico para el paso de izquierda a derecha de una DW plana a través de una fila de nanopozos. Se encontró una fuerte dependencia de los campos de grabación tanto con el tamaño de los nanopozos (con un incremento de un factor 3 al disminuir el tamaño de 10 μm a 1 μm) como con la distancia entre ellos. La Fig. 4 muestra el resultado de una simulación del paso de una DW a través de una fila de nanopozos asimétricos de 4 μm de tamaño en un campo de grabación de 20 Oe con una distancia variable entre nanopozos ($d = 2 \mu\text{m}$, 4 μm , 2.75 μm y 2.75 μm de arriba a abajo respectivamente).

En esta imagen puede verse como la DW está a punto de superar la fila de nanopozos en la región donde la distancia entre nanopozos es mayor ($d=4\mu\text{m}$) mientras que permanece anclada en los nanopozos en el resto de la fila. De esta manera, en el nanocompuesto magnético ordenado que se muestra en la Fig. 4, al aplicar un campo
5 de 20 Oe solo se graba un estado en la región superior del mismo.

REIVINDICACIONES

1. Soporte magnético para la grabación y lectura de información mediante desplazamiento de paredes de dominio magnéticas que comprende:
 - 5 a) un circuito magnético definido en una lámina delgada magnética con anisotropía uniaxial;
 - b) un nanocompuesto constituido por una red bidimensional de nanopozos asimétricos rellenos de otro material magnético de mayor coercitividad y/o anisotropía que la lámina delgada magnética.
- 10 2. Soporte magnético según la reivindicación 1 caracterizado por que la lámina delgada magnética está hecha de un material magnético amorfo basado en aleaciones de $\text{Co}_x\text{Si}_{1-x}$ o $\text{Co}_x\text{Zr}_{1-x}$, con comportamiento magnético blando.
3. Soporte magnético según la reivindicación 1 caracterizado por que los nanopozos están rellenos de una aleación de $\text{Gd}_x\text{Co}_{1-x}$ en la que los momentos magnéticos del Gd dominan la orientación de la imanación a temperatura ambiente.

15
4. Soporte magnético según la reivindicación 1 caracterizado por que los nanopozos están rellenos de Co policristalino con mayor imanación de saturación que la lámina delgada magnética.
- 20 5. Soporte magnético según la reivindicación 1, caracterizado por que la red bidimensional de nanopozos de estructura asimétrica es cuadrada.
6. Soporte magnético según la reivindicación 1 caracterizado por que el circuito magnético se define en torno a la región nanoestructurada con la red bidimensional de nanopozos asimétricos, mediante una zanja que separa dicha

25

 región del resto de la lámina delgada magnética, empleando litografía óptica y ataque químico.
7. Método de almacenamiento de información y lectura mediante desplazamiento de paredes magnéticas que comprende las siguientes etapas:

- a) grabación del estado magnético positivo o negativo mediante una señal de campo magnético que introduce una pared de dominio en un nanocompuesto magnético ordenado nanoestructurado de forma asimétrica bidimensional a partir de un estado de saturación positiva o negativa;
- 5 b) lectura del estado grabado según la etapa a) mediante la aplicación de una señal alterna de campo magnético de amplitud inferior al 20% del campo coercitivo sobre el nanocompuesto magnético ordenado nanoestructurado de forma asimétrica bidimensional, que produce una pérdida o ganancia de imanación cuyo signo indica el estado grabado.
- 10 8. Método según la reivindicación 7, caracterizado por que la señal de campo magnético de lectura es una onda triangular producida por un generador de ondas y amplificada por una fuente de corriente que alimenta un electroimán encargado de generar el campo magnético sobre el nanocompuesto magnético ordenado nanoestructurado de forma asimétrica bidimensional.
- 15 9. Método según la reivindicación 8, caracterizado por que el campo magnético se aplica en el eje fácil de anisotropía uniaxial del nanocompuesto magnético ordenado nanoestructurado de forma asimétrica bidimensional.
- 20 10. Método según la reivindicación 7 caracterizado por que la lectura de las variaciones de la imanación se realiza mediante la medida del efecto Kerr transversal en el nanocompuesto magnético ordenado nanoestructurado para obtener una señal de voltaje.
- 25 11. Uso del método según la reivindicación 7, para la encriptación de información en la secuencia de campo de lectura y/o escritura entre dos usuarios con dispositivos de calibraciones iguales.
12. Uso según la reivindicación 11 caracterizado por que los valores de campo necesarios para la grabación y lectura de los estados magnéticos se diseñan mediante simulaciones micromagnéticas.
13. Uso según la reivindicación 11 caracterizado por que la calibración de los valores de campo necesarios para la grabación y lectura de los estados

magnéticos se hace mediante un microscopio de dominios magnéticos por efecto Kerr.

FIG. 1

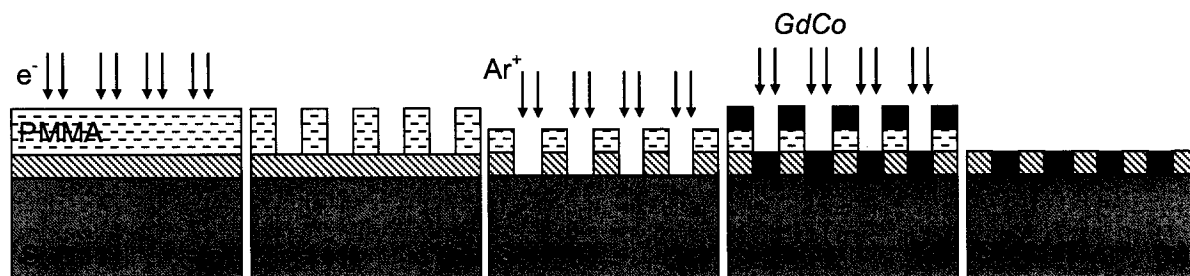


FIG. 2A

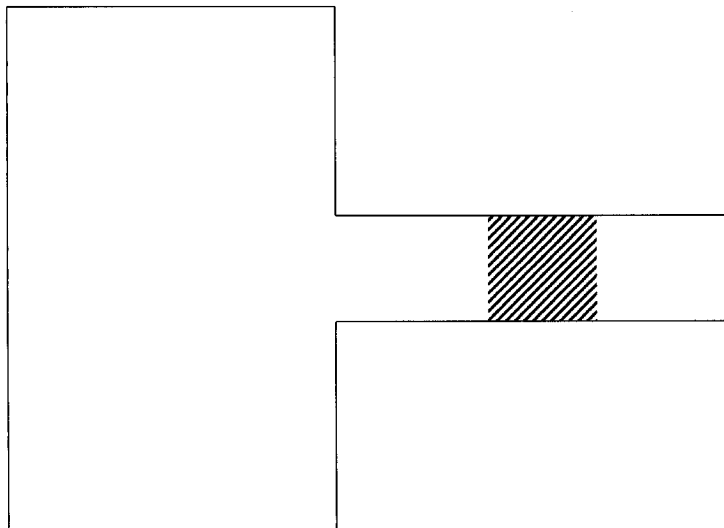


FIG. 2B

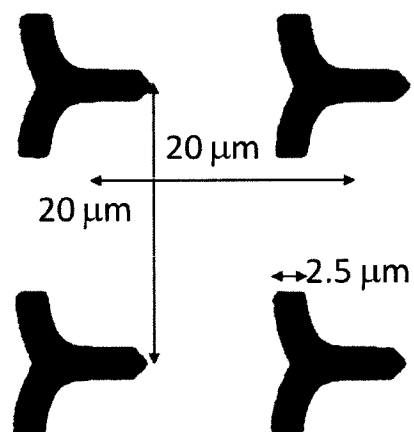


FIG. 3

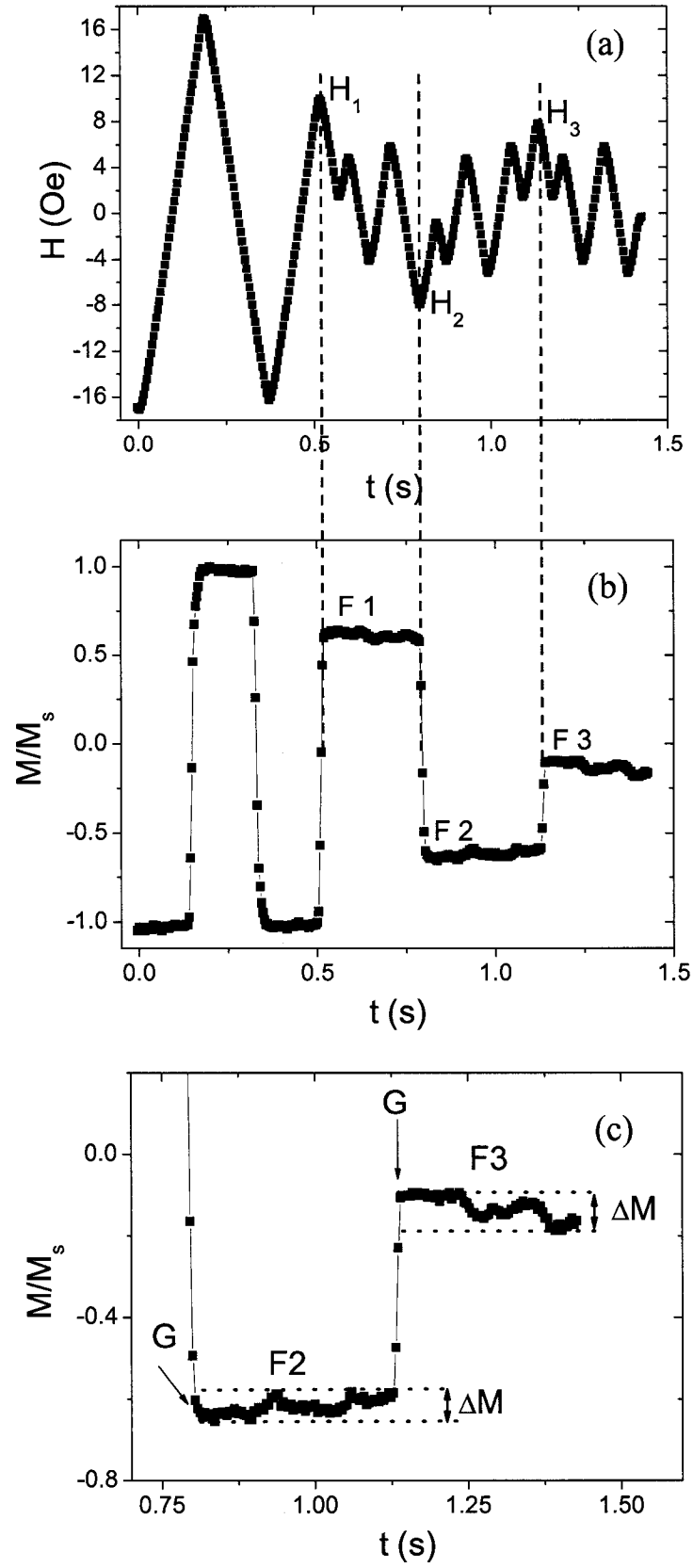


FIG. 4

